DOI: 10.5846/stxb201609091830
王晓利,侯西勇.1961—2014 年中国沿海极端气温事件变化及区域差异分析.生态学报,2017,37(21):7098-7113.
Wang X L, Hou X Y.Analysis of spatiotemporal variations and regional differences in extreme temperature events in the coastal area of China during 1961—2014.Acta Ecologica Sinica,2017,37(21):7098-7113.

1961—2014 年中国沿海极端气温事件变化及区域差异分析

王晓利[1,2,3],侯西勇[1,3,*]
1 中国科学院烟台海岸带研究所,烟台　264003
2 中国科学院大学, 北京　100049
3 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 烟台　264003

摘要:基于 1961—2014 年 156 个地面气象站日尺度的气温数据集,利用趋势分析、小波分析、Mann-Kendall 检验、累积距平、Pettitt 检验、主成分分析等方法分析了中国沿海地区极端气温事件的时空变化特征。结果表明:中国沿海及各子区域极端气温暖指数呈上升趋势,冷指数和气温日较差呈下降趋势,夜指数的年际倾向率明显大于昼指数的年际倾向率;除相对指数、极高值指数和冷(暖)持续日数的多年均值在各子区域之间相差不大以外,霜冻日数、冰冻日数以及气温日较差的多年均值从北至南依次递减,与之相反,夏季日数、热夜日数、极端气温极低值指数以及生长季长度的多年均值则从北至南依次增加。各子区域极端气温指数年际间的主周期介于 2—8 a,均无显著的年代际震荡周期;各子区域极端气温指数的突变主要发生在 1980s 和 1990s 期间,冷指数和极低值指数的突变时间稍早于暖指数和极高值指数的突变时间,突变后,极端暖事件和气温的极值事件进入多发阶段,极端冷事件进入相对少发的阶段;主成分分析中第一主成分高载荷的极端气温指数对日均气温和日最高(低)气温均有较好的指示性,这类极端指数两两之间的相关性也较强,低载荷的极端气温指数对日均气温和日最高(低)气温的指示性相对较弱,与其他极端气温指数之间的相关性也均较弱。

关键词:极端气温;时空变化;区域差异;中国沿海

Analysis of spatiotemporal variations and regional differences in extreme temperature events in the coastal area of China during 1961—2014

WANG Xiaoli[1,2,3], HOU Xiyong[1,3,*]
1 *Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai* 264003, *China*
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
3 *Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Yantai* 264003, *China*

Abstract: Based on the daily temperature dataset of 156 weather station records, a set of statistical methods, including trend analysis, Wavelet analysis, Mann-Kendall test, accumulative anomaly analysis, Pettitt test, and principal component analysis was employed to investigate the spatial and temporal variations of the extreme temperature events from 1961 to 2014 in the coastal area of China. Results of the trend analysis demonstrated an upward trend in warm extremes and a downward trend in cold extremes as well as diurnal temperature range (DTR). The decadal trend rates of the night extremes were obviously higher than those of the day extremes in the coastal area of China. Generally, a decrease was observed in the multi-year averages of the frost days (FD0), ice days (ID0) and diurnal temperature range (DTR), and an increase was

基金项目:国家自然科学基金 Belmont 论坛国际合作项目(NSFC-BF/IGFA,31461143032);中国科学院战略性先导科技专项(XDA11020205)
收稿日期:2016-09-09;　　**修订日期:**2017-01-10
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xyhou@ yic.ac.cn

observed in the mutil-year averages of the summer days (SU25), tropical nights (TR20), minimum value of daily maximum temperature (TNx), minimum value of daily minimum temperature (TNn) and growing season length (GSL) from north to south. However, a little variation was observed in the multi-year averages of the cool days (TX10p), cool nights (TN10p), warm days (TX90p), warm nights (TN90p), maximum value of daily maximum temperature (TXx), maximum value of daily minimum temperature (TNx), cold spell duration index (CSDI) and warm spell duration index (WSDI) between the sub-regions and the entire coastal area of China. The primary period of extreme temperature indices varied from 2 to 8 years in the sub-regions of the coastal area of China, and no significant decadal period was detected. The mutation time of extreme temperature indices occurred mainly in the 1980s and the 1990s in all sub-regions. Additionally, the cold extremes and minimum values of daily maximum (minimum) temperature mutated earlier than those of the warm extremes and maximum values of daily maximum (minimum) temperature. After mutation, the extreme warm events and extreme value events tended to occur frequently, whereas the occurrence of extreme cold events decreased gradually. The extreme temperature indices holding high load in the first principal component showed strong positive correlations with each other and exhibited high contributions to the daily average and daily maximum (minimum) temperature. On the other hand, the extreme temperature indices holding low load in the first principal component presented weak correlations with other extreme indices and showed low contributions to the daily average and daily maximum (minimum) temperature.

Key Words: extreme temperature; spatial-temporal variation; regional difference; coastal area of China

IPCC 第 5 次评估报告指出，全球气候变化比原来认识的要更加严重，近 30 a 以来全球变暖趋势更加显著[1]。与平均气温相比，极端气温事件对全球气候变化更加敏感，而且，其发生频率的加快以及发生强度的加剧对生态环境和经济社会可持续发展均构成了巨大挑战和严重威胁，从而引发人们更多的关注[2-4]。20 世纪后半叶，全球 70%以上的陆地冷夜日数在明显减少而暖夜日数在显著增加[5]。自 1950s 以来，冷日、夏日等极端气温昼指数以及热夜、冷夜和暖夜等极端气温夜指数的变化趋势均表明南美洲呈升温趋势[6]。1941—2007 年期间，葡萄牙地区呈持续增温状态，夏日、热夜等极端气温指数呈显著上升趋势[7]。亚洲国家中，菲律宾[8]、印度[9]、蒙古国[10]、格鲁吉亚[11]等极端气温指数的变化趋势均揭示了气温变暖的事实。在中国，西北干旱区的夏日、暖日和暖夜等显著增加，冰日、冷日和极端温度年较差显著减少[12-13]；西南[14]、华南[15]等地区极端暖事件发生频率也呈上升趋势；长江流域[16]、黄河流域[17]和海河流域[18]等近几十年内极端气温指数变化幅度不一，但均呈增温趋势。

中国沿海地区是欧亚大陆和西太平洋之间的过渡地带，陆海之间大规模、频繁的物质迁移和能量交换使得该区域的自然环境复杂多变[19]。沿海地区人口密度大、产业和设施密集、经济发展迅猛，台风、风暴潮等突发性灾害以及海岸侵蚀、海水入侵、湿地退化等缓发性灾害不断，尤其是在全球气候变化背景下，高温热浪、低温冰冻、强降水、干旱等极端气候事件频繁发生[20-21]，导致区域生态环境不断恶化、脆弱性不断增强。近年来，针对中国沿海地区极端气候的认识得到了提高，例如，研究表明，华南沿海近百年来 2 月份极端气候事件发生频率呈显著上升趋势，且以极端暖事件为主[15]；东南沿海旱涝变化具有明显的阶段性特征[22]；海岸带地区极端气温指数的变化趋势与经纬度和海拔高度具有一定的相关性[23]。然而，中国沿海自北至南纬度跨越大，气候、地形和下垫面因子复杂多变，已有的研究未能充分结合地理特征和研究区气候类型的变化，缺乏对极端气候变化特征的区域差异特征分析。因此，本文基于《中国气象地理区划》对中国沿海地区进行分区，对近 54 a 来极端气温事件的时空变化特征进行分析，并着重开展区域差异比较研究，以更好地认识沿海地区极端气温事件的变化特征和规律，为科学适应、减缓和应对沿海地区气候异常提供参考和依据。

1　资料与方法

以省级行政区划为界，将中国沿海省份和地区确定为研究区（未包括台湾地区、南海诸岛和海域），以下

简称中国沿海。依据中国气象局提出的中国气象地理区划进行分区，从北至南依次为东北沿海地区（I 区）、华北沿海地区（II 区）、黄淮沿海地区（III 区）、江淮沿海地区（IV 区）、江南沿海地区（V 区）和华南沿海地区（VI 区）共 6 个子区域（图 1）。气象资料来源于中国气象局国家气象信息中心。依据资料的连续性以及历史记录数据应超过 50 a 为标准，选取 156 个地面气象站 1961—2014 年的日最高（低）气温和日平均气温等资料，利用 RClimDex 软件对气象数据进行质量控制，如缺测值的处理、标准差检测、异常值筛选等。采用 ETCCDMI 推荐的 16 个极端气温指数（表 1），利用线性倾向估计法计算极端气温指数的年际倾向率用以分析其时间变化趋势和空间分布规律[24]；运用连续小波方法分析要素的周期性，并利用小波方差对周期的显著性进行检验[25]；综合采用 Mann-Kendall 突变检验[26]、累积距平[27]和 Pettitt 检验[28]对极端气温指数的突变特征进行检验；利用 SPSS 软件进行主成分分析和相关性分析；各要素变化趋势的显著性检验均采用 Mann-Kendall 趋势检验完成。

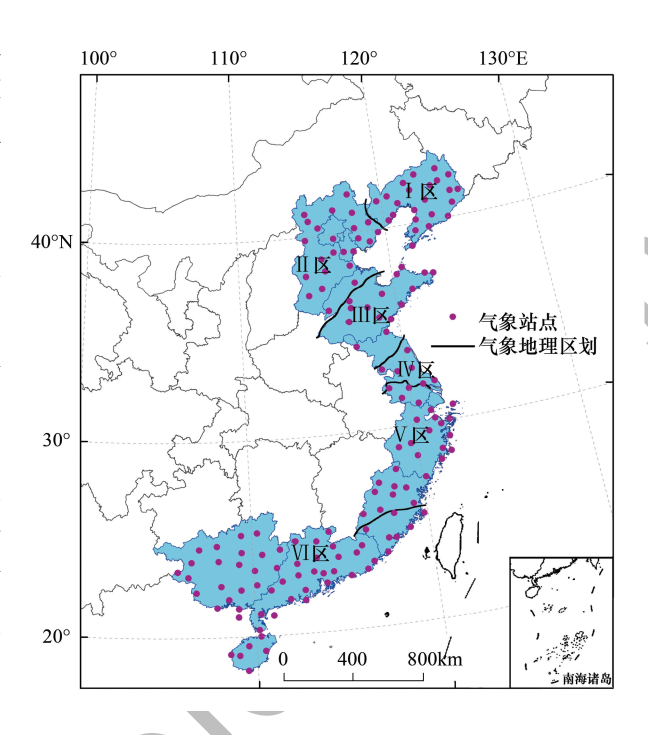


图 1 中国沿海气象站点空间分布及气象地理分区

Fig.1 Distribution of meteorological stations and meteorological zones in the coastal area of China

表 1 极端气温指数的定义与分类

Table 1 Definition and classification of extreme temperature indices

分类 Classification	指数代码 ID	定义 Definition	单位 Units
相对指数 Relative indices	TX10p	日最高气温<10%分位值的日数	d
	TN10p	日最低气温<10%分位值的日数	d
	TX90p	日最高气温>90%分位值的日数	d
	TN90p	日最低气温>90%分位值的日数	d
绝对指数 Absolute indices	FD0	年内日最低气温<0℃的日数	d
	ID0	年内日最高气温<0℃的日数	d
	SU25	年内日最高气温>25℃的日数	d
	TR20	年内日最低气温>20℃的日数	d
极值指数 Extreme value indices	TXx	每月内日最高气温的最大值	℃
	TNx	每月内日最低气温的最大值	℃
	TXn	每月内日最高气温的最小值	℃
	TNn	每月内日最低气温的最小值	℃
其他指数 Other indices	WSDI	日最高气温>90%分位值的连续 6 天的日数	d
	CSDI	日最低气温<10%分位值的连续 6 天的日数	d
	GSL	日平均气温首先出现至少连续 6 日>5℃，以及首先出现在 7 月 1 日后（指北半球）日平均气温至少连续 6 日<5℃的总日数	d
	DTR	年内日最高气温与最低气温的差值	℃

TX10p：冷昼日数 Cool days；TN10p：冷夜日数 Cool nights；TX90p：暖昼日数 Warm days；TN90p：暖夜日数 Warm nights；FD0：霜冻日数 Frost days；ID0：冰冻日数 Ice days；SU25：夏季日数 Summer days；TR20：热夜日数 Tropical nights；TXx：日最高气温的极高值 Maximum value of daily maximum temperature；TNx：日最低气温的极高值 Maximum value of daily minimum temperature；TXn：日最高气温的极低值 Minimum value of daily maximum temperature；TNn：日最低气温的极低值 Minimum value of daily minimum temperature；WSDI：暖持续日数 Warm spell duration index；CSDI：冷持续日数 Cold spell duration index；GSL：生长季长度 Growing season length；DTR：气温日较差 Diurnal temperature range

2　结果与讨论

2.1　极端气温指数的空间分布特征

2.1.1　相对指数的空间分布

1961—2014 年,中国沿海极端气温相对指数年际倾向率的空间分布特征如图 2 所示。整个沿海地区,96%以上的气象站点的冷昼(夜)日数呈下降趋势,90%以上的站点的暖昼(夜)日数呈上升趋势。冷昼(夜)日数和暖昼(夜)日数下降和上升趋势通过显著性检验的站点比例分别是 56%(94%)和 66%(93%)。东北沿海、华北沿海北部、黄淮沿海、江淮沿海和江南沿海北部的站点冷昼日数的下降幅度较大,东北沿海南部、华北

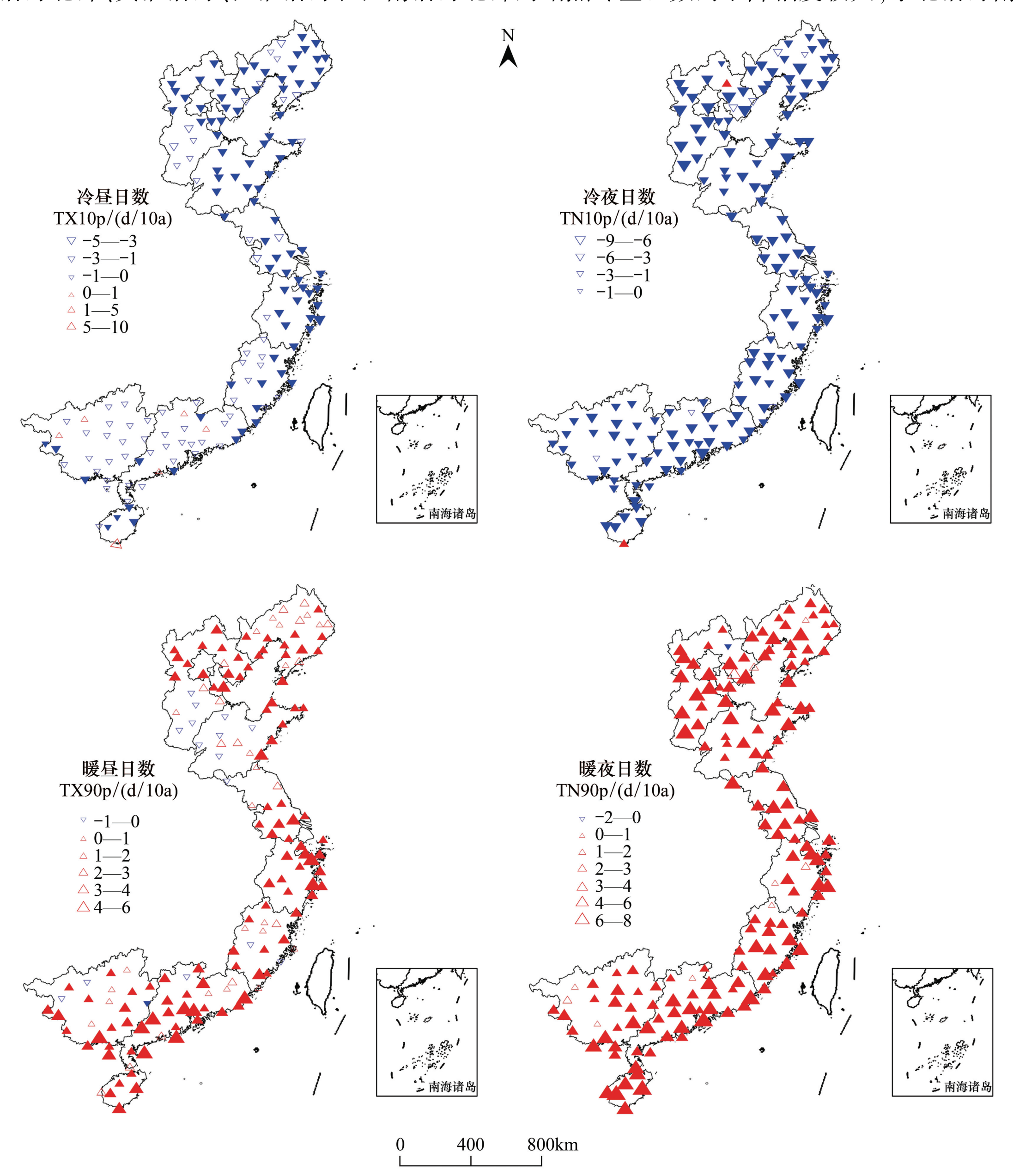


图 2　1961—2014 年中国沿海极端气温相对指数年际倾向率的空间分布

Fig.2　Spatial distribution of decadal trend rate in extreme temperature relative indices in the coastal area of China during 1961—2014

方向朝上和朝下的三角形分别表示呈上升和下降的变化趋势,其中,实心三角形代表变化趋势通过了置信度 95%的显著性检验,空心三角形代表变化趋势不显著

沿海北部、江淮沿海南部、江南沿海北部和华南沿海南部的站点暖昼日数的上升幅度较大;冷夜日数下降幅度较大的站点主要分布在东北和华北沿海境内,暖夜日数上升幅度较大的站点在整个沿海地区均有分布。

2.1.2 绝对指数的空间分布

沿海地区极端气温绝对指数年际倾向率的空间分布如图 3 所示。约 81%和 62%的气象站点的霜冻日数和冰冻日数呈下降趋势,通过显著性检验的站点比例分别约为 67%和 22%;约 96%和 99%的站点的夏季日数和热夜日数呈上升趋势,通过显著性检验的站点比例分别约为 62%和 75%。长江以北沿海地区站点的霜冻日数和冰冻日数的下降幅度相对较大,华南沿海临海一带以及华南沿海南部共 28 个气象站的霜冻日数,以及

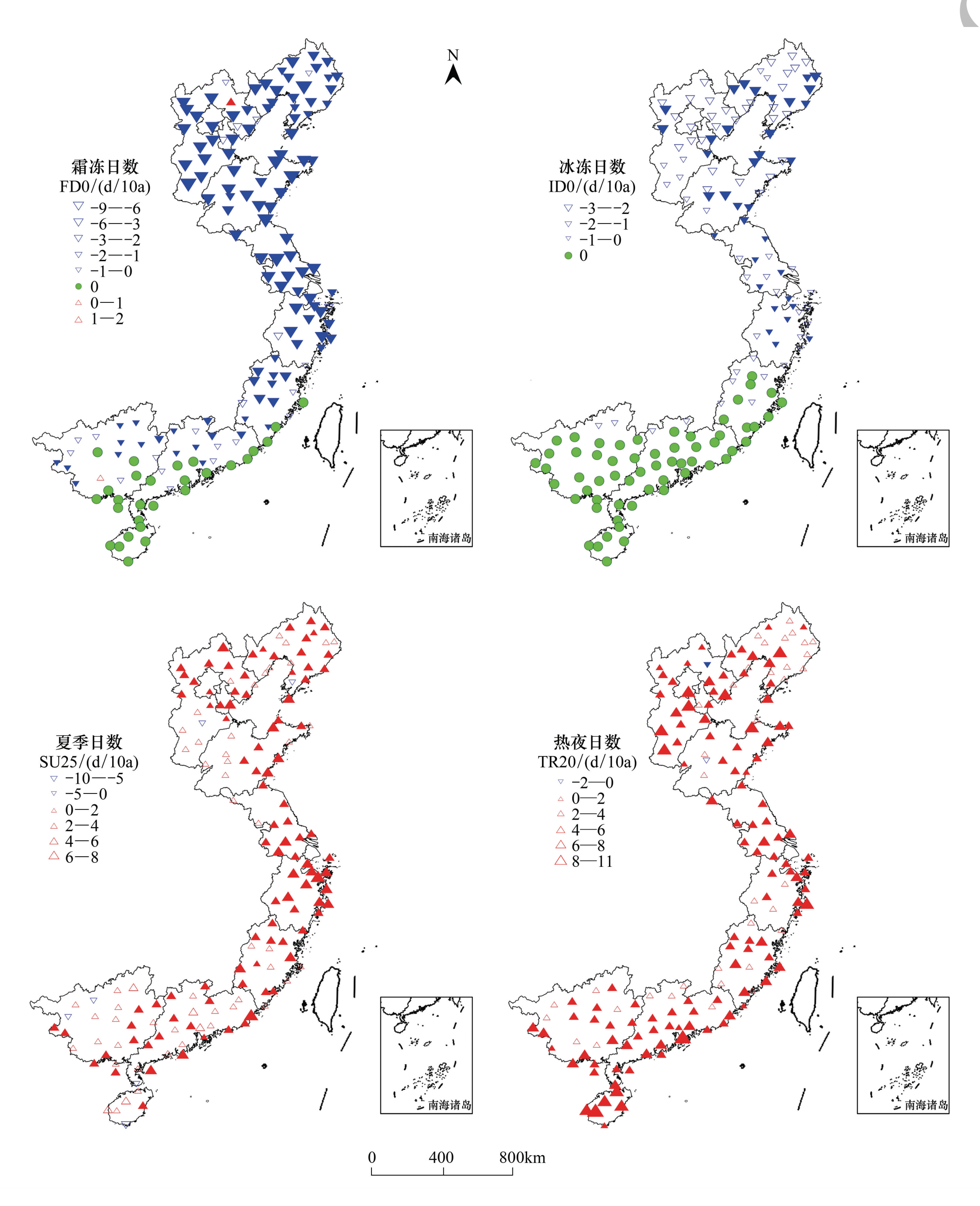


图 3 1961—2014 年中国沿海极端气温绝对指数年际倾向率的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of decadal trend rate in extreme temperature absolute indices in the coastal area of China during 1961—2014

华南沿海和江南沿海南部共 59 个气象站点的冰冻日数在过去 54 a 期间年际倾向率为 0,即无任何变化趋势。夏季日数和热夜日数呈上升趋势的气象站点在整个沿海地区均匀分布。

2.1.3　极值指数的空间分布

1961—2014 年,沿海地区绝大部分气象站点的极值指数呈上升趋势(图 4)。以日最高气温的极高值、日最低气温的极高值、日最高气温的极低值以及日最低气温的极低值为序,呈上升趋势的站点比例分别约为 79%、98%、97%和 96%,其中,通过了显著性检验的站点比例分别约为 25%、72%、14%和 74%。分析发现,极端气温极值指数上升幅度较大的气象站点主要分布在长江以北的沿海地区。

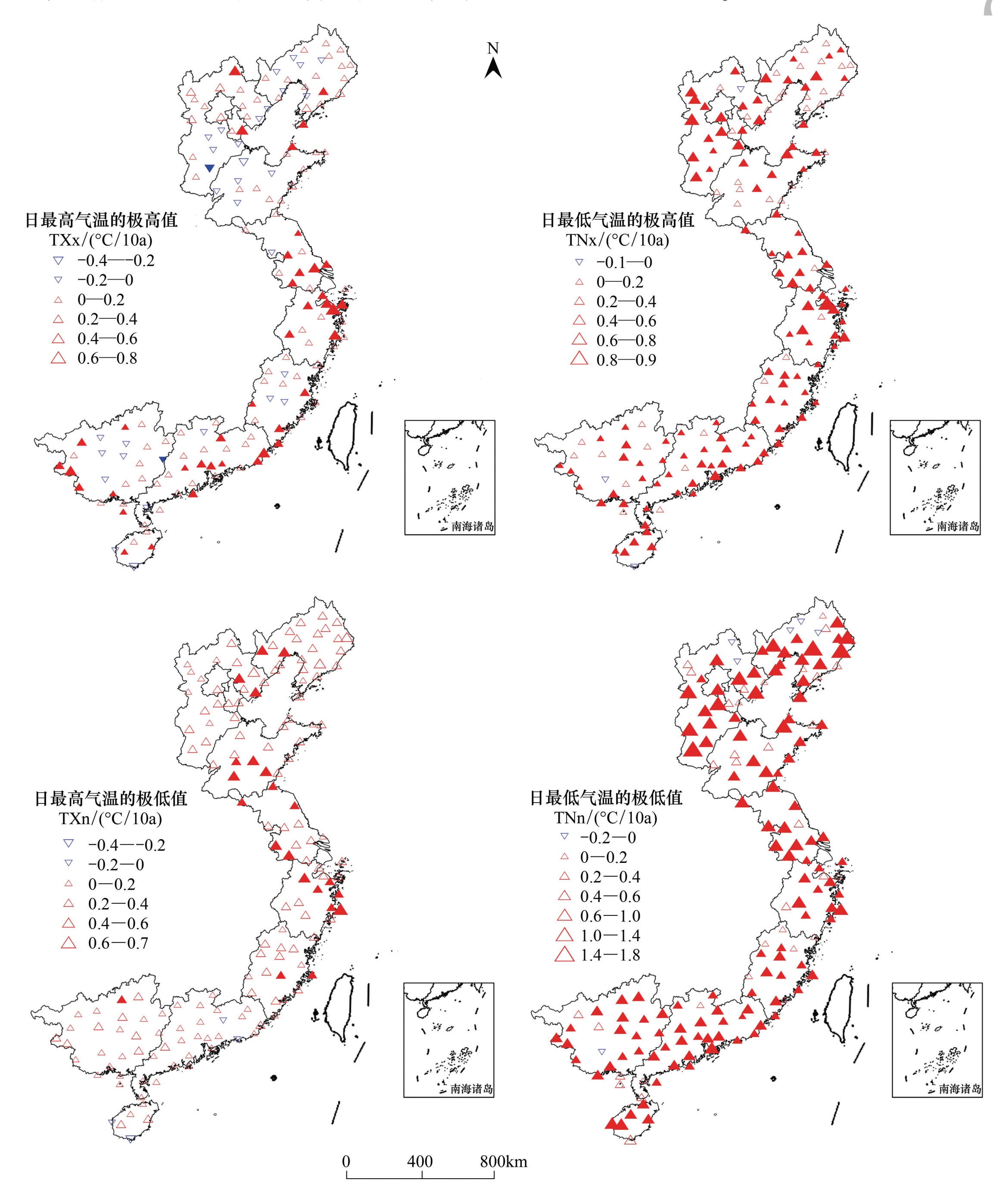


图 4　1961—2014 年中国沿海极端气温极值指数年际倾向率的空间分布

Fig.4　Spatial distribution of decadal trend rate in extreme value indices in the coastal area of China during 1961—2014

2.1.4　其他指数的空间分布

图 5 为极端气温其他类指数年际倾向率的空间分布图。沿海地区暖(冷)持续日数呈上升(下降)趋势的站点个数较多,占总站点数的 78%(97%),其中,约 35%(62%)的站点通过了显著性检验。暖持续日数呈明显上升趋势的站点主要分布在东北沿海和华北沿海北部地区,呈下降趋势的站点主要分布在江南沿海南部以及华南沿海境内。江南沿海和华南沿海地区的气象站点冷持续日数的下降幅度相对更大,变化趋势也更明显。约 87%的站点的生长季长度呈上升趋势,该类站点主要分布在华南沿海以北地区,但长江以北沿海地区的站点生长季长度的上升幅度相对较大,上升趋势更明显。中国沿海气温日较差以下降趋势为主,其中,长江以北站点的下降幅度更大,变化趋势更明显。约有 20%的站点的气温日较差呈上升趋势,该类站点在整个沿海地区零星分布。

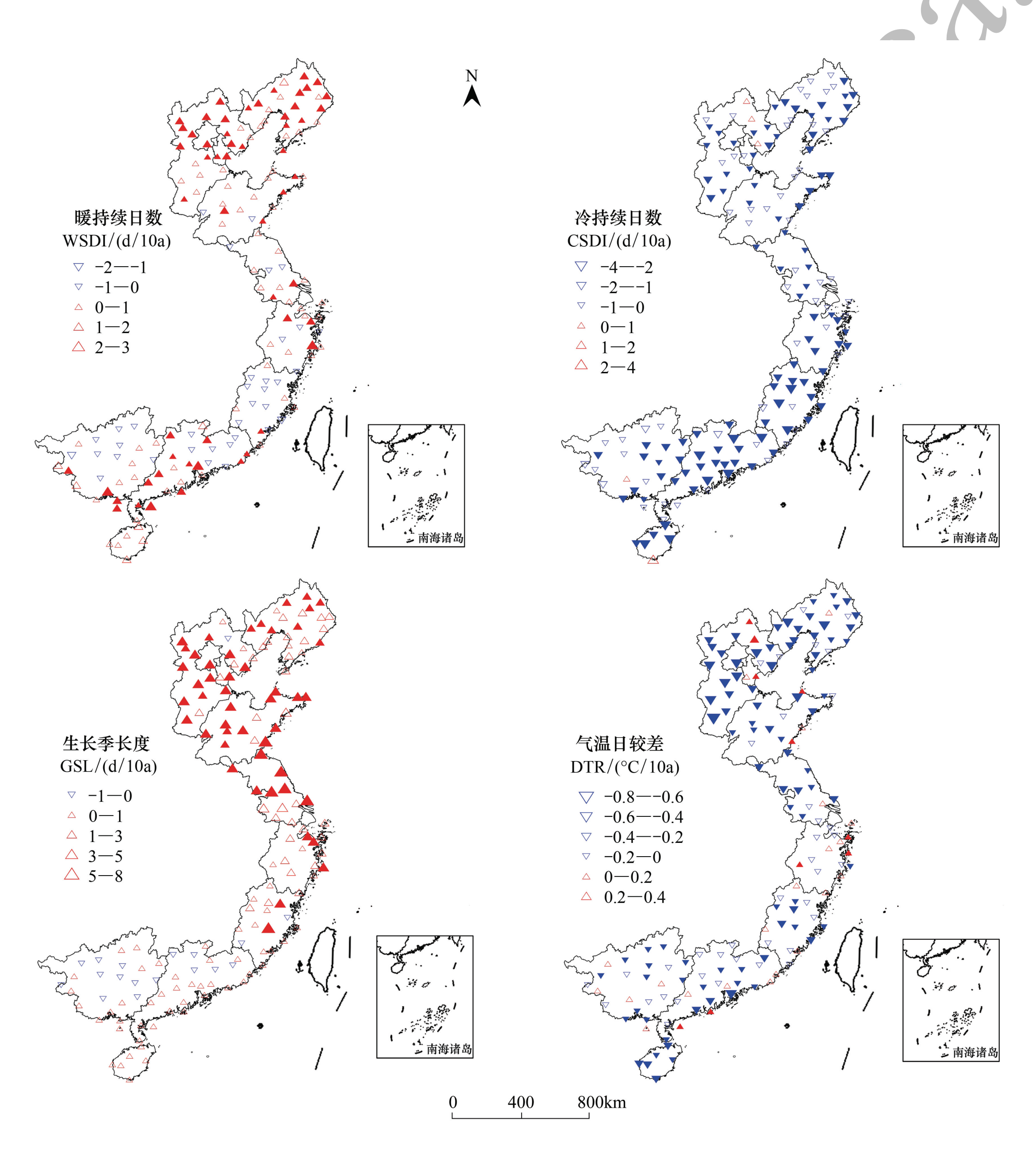


图 5　1961—2014 年中国沿海极端气温其他指数年际倾向率的空间分布

Fig.5　Spatial distribution of decadal trend rate in extreme temperature other indices in the coastal area of China during 1961—2014

2.2 极端气温指数的时间变化特征

2.2.1 极端气温指数的年际变化趋势

1961—2014 年中国沿海及各子区域极端气温指数的多年均值和年际倾向率如表 2 所示。

表 2　1961—2014 年中国沿海极端气温指数的多年均值与年际倾向率

Table 2　Multi-year average and decadal trend rate in extreme temperature indices in the coastal area of China during 1961—2014

指数 Index	Ⅰ区 Region Ⅰ		Ⅱ区 Region Ⅱ		Ⅲ区 Region Ⅲ		Ⅳ区 Region Ⅳ		Ⅴ区 Region Ⅴ		Ⅵ区 Region Ⅵ		全区 Entire region	
	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat
TX10p	17.71d	-1.47* d/10a	17.77	-1.53*	17.75	-1.88*	17.82	-1.53*	17.84	-1.68*	17.90	-0.50	17.83	-1.18*
TN10p	17.66d	-3.54* d/10a	17.68	-4.36*	17.62	-4.01*	17.58	-4.17*	17.64	-3.49*	17.65	-2.87*	17.65	-3.47*
TX90p	17.92d	1.39* d/10a	17.88	1.40*	17.84	1.37*	17.97	1.80*	17.93	2.33*	17.74	2.20*	17.84	1.72*
TN90p	17.80d	2.64* d/10a	17.86	3.63*	17.79	3.16*	17.80	3.61*	17.72	3.16*	17.66	3.47*	17.74	3.30*
FD0	147.33d	-2.67* d/10a	131.83	-3.68*	92.42	-4.07*	52.95	-5.41*	19.65	-2.58*	1.14	-0.24*	56.79	-2.12*
ID0	59.50d	-1.80* d/10a	34.78	-1.50	17.33	-1.64*	1.98	-0.41*	0.35	-0.13*	0.03	0.00	15.78	-0.69*
SU25	97.35d	2.19* d/10a	119.81	1.89*	103.59	2.56*	127.24	2.54*	151.34	3.81*	222.57	1.97*	160.35	2.40*
TR20	33.27d	2.35* d/10a	45.99	3.36*	60.94	2.91*	88.94	3.43*	112.59	2.97*	182.40	3.26*	111.70	3.07*
TXx	33.98℃	0.09* ℃/10a	36.58	0.09	34.59	0.08	36.36	0.23*	36.93	0.21*	36.40	0.11*	36.01	0.12*
TNx	24.38℃	0.17* ℃/10a	25.00	0.30	26.01	0.21*	27.92	0.24*	27.22	0.27*	27.49	0.17*	26.48	0.22*
TXn	-12.75℃	0.35℃/10a	-7.91	0.27	-4.97	0.34*	-0.88	0.25	2.09	0.30*	7.95	0.13	-0.15	0.24*
TNn	-23.49℃	0.59* ℃/10a	-18.32	0.67*	-12.35	0.54*	-7.87	0.53*	-4.38	0.38*	2.82	0.39*	-7.44	0.48*
WSDI	2.10d	0.86* d/10a	2.35	0.89*	2.30	0.48	3.40	0.29	3.77	0.31	3.64	0.46*	3.10	0.55*
CSDI	2.37d	-0.83* d/10a	1.89	-0.65*	1.88	-0.80*	1.80	-0.69*	3.03	-1.19*	4.44	-1.19*	3.10	-1.00*
GSL	222.77d	1.74* d/10a	239.31	2.81*	259.38	3.72*	305.19	5.34*	349.03	1.84*	363.45	0.06	308.80	1.61*
DTR	10.89℃	-0.17* ℃/10a	11.38	-0.25*	8.40	-0.14*	8.10	-0.18*	7.97	-0.05	7.41	-0.10	8.76	-0.14*

Ma:多年均值 Multi-year average;Rat:年际倾向率 Decadal trend rate; * 表示变化趋势通过置信度 95%的显著性检验

整个沿海地区极端气温指数的变化趋势比较明显,均通过了置信度 95%的显著性检验。相对指数中,冷昼(夜)指数和暖昼(夜)指数分别呈下降和上升趋势;冷昼、冷夜日数的年际倾向率分别为-1.18 d/10a 和-3.47 d/10a,暖昼、暖夜日数的倾向率分别为 1.72 d/10a 和 3.3 d/10a,冷(暖)夜指数的年际倾向率明显大于冷(暖)昼指数的年际倾向率。绝对指数中,霜冻日数和冰冻日数呈下降趋势,其中,霜冻日数的下降幅度相对更大,倾向率为-2.12 d/10a;夏季日数和热夜日数分别以 2.4 d/10a 和 3.07 d/10a 的年际倾向率呈上升趋势。以日最高气温的极高值、日最低气温的极高值、日最高气温的极低值以及日最低气温的极低值为序,极值指数的年际倾向率分别为 0.12、0.22、0.24、0.48 ℃/10a,其中,日最低气温的极低值的上升趋势最明显,与之相反,日最高气温的极高值的上升趋势最小。其他指数中,暖持续日数和冷持续日数的年际倾向率分别为 0.55 d/10a和-1 d/10a,表明沿海地区暖持续日数在增加,而冷持续日数在逐渐减少;生长季长度和气温日较差的年际倾向率分别为 1.61 d/10a 和-0.14 ℃/10a,生长季长度呈一定程度的延长,而气温日较差呈下降趋势。

各子区域极端气温指数的变化趋势与全区的变化趋势完全一致,但各子区域之间大部分指数的多年均值差异明显,年际倾向率也不尽相同:(1)相对指数:6 个子区域的多年均值相差不大,在 17.58—17.97 d 之间;华南沿海地区冷昼日数的年际倾向率最小,变化趋势未通过显著性检验,其他子区域之间相对指数的倾向率相差较小,变化趋势均通过了显著性检验。(2)绝对指数:霜冻(冰冻)日数和夏季(热夜)日数的多年均值从北至南分别依次递减和递增;江淮沿海霜冻日数的年际倾向率最大,达-5.41 d/10a,华南沿海的最小,仅为-0.24 d/10a;冰冻日数的年际倾向率在长江以北的子区域较大,在长江以南的子区域则较小,其中,华南沿海冰冻日数基本保持不变;各子区域之间夏季日数和热夜日数的年际倾向率分别相差不大;除华北和华南沿海地区冰冻日数的变化趋势不显著以外,其余子区域绝对指数的变化趋势均通过了显著性检验。(3)极值指

数:极高值指数(日最高气温的极高值、日最低气温的极高值)的多年均值分别在各子区域之间相差不大,而极低值指数(日最高气温的极低值、日最低气温的极低值)的多年均值从北至南依次递增;各子区域极值指数的年际倾向率在 0.09—0.67 ℃/10a 之间,极低值指数的倾向率一般大于极高值指数的倾向率;黄淮(含)以南沿海地区极值指数变化趋势的显著性相对更明显。(4)其他指数:冷(暖)持续日数的多年均值在各子区域之间相差较小,但冷持续日数的年际倾向率在南方沿海相对较大,而暖持续日数的倾向率在北方沿海相对较大;生长季长度的多年均值从北至南依次递增,年际倾向率以黄淮沿海的 3.72 d/10a 为最大,华南沿海的 0.06 d/10a 为最小;各子区域气温日较差的多年均值从北至南依次递减,华北和江淮沿海的年际倾向率分别以-0.25 ℃/10a 和-0.05 ℃/10a 居首位和末位;黄淮(含)以北沿海地区极端气温其他指数变化趋势的显著性相对更强。

中国沿海及其子区域极端气温的暖指数和冷指数均分别呈现为上升和下降的趋势,与全国[29]、西南[30]、西北[13]等地区暖、冷指数的变化趋势相一致。对比极端气温指数的变化幅度可发现,除冷指数的变幅低于西北地区的以外,中国沿海暖(冷)指数的增加(减少)幅度一般高于全国、西南和西北地区的平均水平,而极值指数和气温日较差的变化幅度在各研究区之间相差不大。

2.2.2 极端气温指数的周期特征

中国沿海气候南北差异大,因此极端气温事件的周期分析和突变分析均以各子区域为研究对象。篇幅所限,仅以华南沿海地区极端气温相对指数为例,对其小波周期特征(图 6)和突变特征进行详尽的说明,其他子区域的分析结果详见相应的图表。

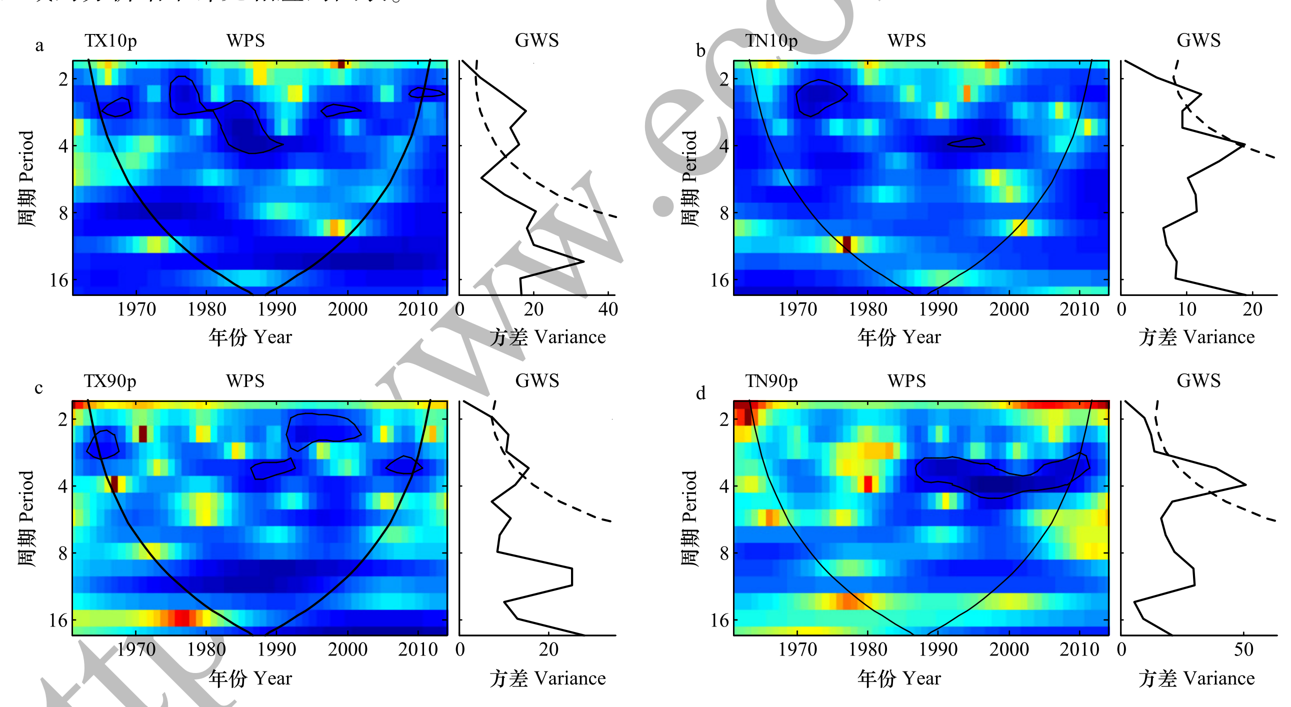


图 6 1961—2014 年华南沿海地区极端气温相对指数的小波功率谱和全局小波谱

Fig.6 Wavelet power spectrum and global wavelet spectrum for the time series of extreme temperature relative indices in the south coastal area during 1961—2014

左图为小波功率谱(Wavelet power spectrum, WPS)图,实线封闭区域表示通过了 95%置信水平的红噪声检验,右图为全局小波谱(Global wavelet spectrum, GWS)图,黑色虚线包含的峰值即为通过了 95%置信水平红噪声检验的显著周期值

由图 6(a)可知,华南沿海地区冷昼日数存在约 1.8—4.2 a 的显著性年际变化周期,第一峰值周期(主周期)约为 2.8 a,该尺度的周期变化在 1960s 后期、1980s 和 1990s 后期 3 个时段内的小波能量最强,振荡最强烈。此外,还存在约 13.2 a 的年代际变化周期,但其可信度不高,未通过显著性检验。图 6(b)显示,冷夜日数的显著性第一、第二峰值周期分别约为 3.9 a 和 2.3 a,各尺度周期的强集中影响时域范围分别为 1990s 前期和

1970s。暖昼日数存在约 1.9—3.5 a 的显著性变化周期,主周期约为 3.3 a,该尺度的周期变化在 1980s 末至 1990s 初以及 21 世纪初等时段内的振荡最强烈(图 6c)。暖夜日数的显著性周期范围介于 2.9—4 a 之间,主周期约为 3.9 a,1987—2012 年是该尺度周期的强集中影响时域范围(图 6d)。

6 个子区域各极端气温指数的主周期(表 3)特征如下:(1)相对指数:东北和华北沿海地区的主周期略小于其他子区域,黄淮沿海地区冷(暖)昼日数的主周期最长,约为 5.6 a;(2)绝对指数:除华北沿海夏季日数和华南沿海冰冻日数的主周期为 5.6 a 以及江淮沿海热夜日数主周期为 2.3 a 之外,其余子区域的均是 3 a 或 4 a 左右;(3)极值指数:华北、黄淮以及江淮沿海日最高气温的极高值的主周期相对较长,约是 5 a 或 6 a 左右,其他子区域温度极高值的主周期约是 2 a 或 3 a,温度极低值指数的主周期以江南和华南沿海地区日最低气温的极低值的最长,分别约是 7 a 和 5 a,其他子区域极低值指数的主周期基本上是 3 a 左右;(4)其他指数:东北沿海暖持续日数的主周期最长,约为 7.9 a,华北、黄淮和江南沿海暖持续日数的主周期均为 3.9 a 左右,冷持续日数的主周期从东北沿海的 4.7 a 减至华南沿海的 2.8 a,各区域生长季长度的主周期较接近,约为 2 a 或 3 a,除黄淮和江南沿海气温日较差的主周期较长,为 4.7 a 以外,其余子区域气温日较差的主周期介于 2—3 a 之间。

表 3　各子区域极端气温指数的主周期/a

Table 3　Primary period of extreme temperature indices in sub-regions

指数 Index	I 区 Region I	II 区 Region II	III 区 Region III	IV 区 Region IV	V 区 Region V	VI 区 Region VI
TX10p	2.3	2.3	5.6	3.3	3.9	2.8
TN10p	2.3	2.3	3.9	2.3	2.3	3.9
TX90p	2.3	–	5.6	3.9	3.3	3.3
TN90p	2.3	–	3.9	3.9	3.9	3.9
FD0	3.9	3.9	3.9	2.8	4.7	3.9
ID0	3.9	3.9	2.8	2.8	3.9	5.6
SU25	3.3	5.6	3.9	3.9	2.8	3.9
TR20	3.3	3.3	3.3	2.3	2.8	3.9
TXx	2.3	4.7	4.7	5.6	2.8	2.3
TNx	2.8	2.8	5.6	2.3	3.3	2.3
TXn	3.3	3.3	3.3	3.3	2.3	2.8
TNn	3.3	3.3	3.3	3.3	6.6	4.7
WSDI	7.9	3.9	3.9	5.6	3.9	4.7
CSDI	4.7	4.7	3.9	3.9	2.8	2.8
GSL	3.3	3.3	2.3	3.3	2.3	2.3
DTR	2.3	2.8	4.7	2.8	4.7	2.8

总之,从北至南各子区域极端气温指数的主周期不尽相同,这主要与沿海地区特殊的气候环境和地理位置差异等因素有关。中国沿海背靠广袤的欧亚大陆,面临浩瀚的太平洋,受季风、环流等大尺度气候因子的影响较大,且沿海地区南北纬度跨越大,地形地貌、覆被变化、水文条件、人文环境以及城市化进程等均会对气候产生不同程度影响的因素具有较大的差异,导致各子区域极端气温事件的周期变化具有一定的复杂性。此外,各子区域主周期均是小于 10 a 的年际间尺度,无显著性的年代际震荡周期,可能是本文的研究时段相对较短,对极端气温事件年代际间周期变化的探究尚显不足。

2.2.3　极端气温指数的突变特征

华南沿海地区 1961—2014 年极端气温相对指数的突变检验结果如图 7 所示。冷昼日数的 M-K 突变检验表明(图 7a),UF(原序列)和 UB(逆序列)统计量曲线在置信区间内共有 3 个交点(1997—1998 年、2009—2010 年、2013—2014 年);累积距平分析结果显示,冷昼日数的累积距平值在 1997 年之前呈上升趋势,之后呈下降趋势,说明华南沿海的冷昼日数在 1997 年前后经历了上升-下降的变化过程;Pettitt 检验得出华南沿海冷

昼日数的突变年份是 1997 年。综合分析可知,华南沿海冷昼日数在 1997 年前后发生了由多到少的突变,表明该区域冷昼日数突变到一个相对少发的阶段。图 7(b)、(c)和(d)分别是华南沿海冷夜日数、暖昼日数和暖夜日数的突变检验曲线图,结合 M-K 突变检验、累积距平值变化趋势以及 Pettitt 检验结果,综合判断出华南沿海地区冷夜日数、暖昼(夜)日数分别在 1988 年和 1986 年前后经历了由多到少和由少到多的突变,表明华南沿海地区冷夜日数和暖昼(夜)日数分别突变到一个相对少发和相对多发的阶段。

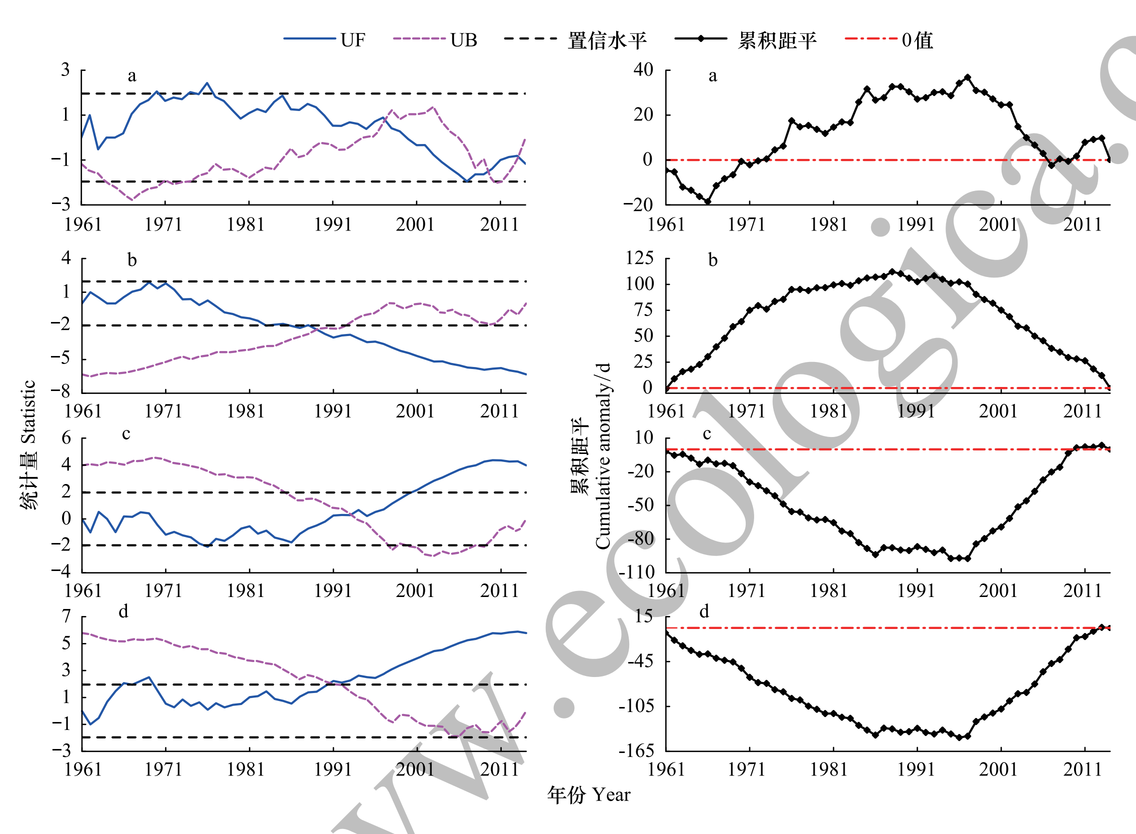


图 7 1961—2014 年华南沿海地区极端气温相对指数的 M-K 突变检验和累积距平值

Fig.7 Mann-Kendall mutation test and cumulative anomaly for the time series of extreme temperature relative indices in the south coastal area during 1961—2014

a,b,c 和 d 分别代表 TX10p(冷昼日数)、TN10p(冷夜日数)、TX90p(暖昼日数)和 TN90p(暖夜日数);左侧图为 M-K 突变判别曲线,右侧图为累积距平值变化曲线

各区域极端气温指数的突变年份和突变前后的变化趋势如表 4 所示。(1)相对指数:黄淮(含)以北沿海地区冷昼(夜)日数的突变时间(1987 年前后)稍早于黄淮以南沿海地区(1990s 中期前后),东北和华南沿海地区暖昼(夜)日数以及华北沿海地区暖夜日数的突变时间在 1980s 末期,早于其他子区域暖昼(夜)日数的突变时间;(2)绝对指数:6 个子区域霜冻日数和冰冻日数的突变时间均在 1980s,而夏季日数和热夜日数的突变均发生在 1990s;(3)极值指数:除华南沿海日最低气温的极高值的突变时间较早,发生在 1970s 以外,其他子区域气温极高值指数的突变均发生在 1990s 和 21 世纪初期,且黄淮(含)以北沿海地区的突变时间早于以南沿海地区的,6 个子区域气温极低值指数的突变时间相对较集中,基本位于 1980s 中末期和 1990s 初期;(4)其他指数:各子区域暖持续日数的突变时间较一致,位于 1990s 中期前后,华南沿海冷持续日数的突变时间最早,位于 1970s 末,其他子区域冷持续日数均在 1980s 和 1990s 发生了突变,华南和东北沿海生物生长季的突变时间分别发生在 1970s 末期和 1980s 初期,早于其他区域生物生长季的突变时间(1980s 末期),除江南沿海气温日较差的突变时间是在 1970 年前后以外,其他区域的均发生在 1980s 初期。综合可知,各子区域极端气温指数突变时间的区域差异规律性不明显,这与极端气温事件自身的随机性、突发性以及各子区域气候

和自然、社会环境的差异等密切相关。

表 4　各子区域极端气温指数的突变年份(年)及变化趋势

Table 4　Mutation time and tendency of extreme temperature indices series in the sub-regions

指数 Index	Ⅰ区 Region Ⅰ		Ⅱ区 Region Ⅱ		Ⅲ区 Region Ⅲ		Ⅳ区 Region Ⅳ		Ⅴ区 Region Ⅴ		Ⅵ区 Region Ⅵ	
	突变时间 MT	趋势 TE	突变时间 MT	趋势 TE	突变时间 MT	趋势 TE	突变时间 MT	趋势 TE	突变时间 MT	趋势 TE	突变时间 MT	趋势 TE
TX10p	1987	↓	1987	↓	1987—1988	↓	1993—1994	↓	1993	↓	1997—1998	↓
TN10p	1987	↓	1987	↓	1988	↓	1992—1993	↓	1993	↓	1988	↓
TX90p	1988—1989	↑	1996	↑	1996	↑	1996	↑	1995	↑	1986	↑
TN90p	1987	↑	1986	↑	1996	↑	1996—1997	↑	1996—1997	↑	1986	↑
FD0	1988	↓	1988—1989	↓	1987—1988	↓	1988	↓	1987	↓	1980s 初	↓
ID0	1988	↓	1987	↓	1985—1986	↓	1985—1986	↓	1984	↓	1987	↓
SU25	1996—1997	↑	1997—1998	↑	1996	↑	1993	↑	1994	↑	1996	↑
TR20	1993	↑	1993	↑	1993	↑	1995	↑	1997	↑	1993—1994	↑
TXx	1996	↑	1996	↑	1996	↑	2000	↑	2001—2002	↑	2002	↑
TNx	1996	↑	1993	↑	1993	↑	1999—2000	↑	1989	↑	1978	↑
TXn	1987	↑	1987	↑	1987—1988	↑	1981	↑	1985—1986	↑	1991—1992	↑
TNn	1987	↑	1987	↑	1987	↑	1991	↑	1985—1986	↑	1986	↑
WSDI	1996	↑	1993—1994	↑	1996	↑	1996	↑	1993	↑	1996—1997	↑
CSDI	1981—1982	↓	1987	↓	1993	↓	1993	↓	1987	↓	1979	↓
GSL	1981	↑	1988	↑	1988—1989	↑	1988	↑	1987—1989	↑	1977—1978	↑
DTR	1983	↓	1983—1984	↓	1983	↓	1981	↓	1970	↓	1980	↓

MT:突变时间 Mutation time;TE:趋势 Tendency;"↑"表示发生了由少到多的突变,"↓"表示发生了由多到少的突变

对沿海地区各子区域极端气温指数的突变年代进行统计分析(图 8)。6 个子区域所有的极端气温指数中,分别共有 48 个和 41 个指数的突变发生在 1980s 和 1990s,仅有 4 和 3 个指数的突变分别发生在 1970s 和 21 世纪初期,表明沿海地区极端气温事件在 1980s 和 1990s 期间发生了明显的突变。进一步分析表明,沿海地区冷指数的突变时间主要集中在 1980s 末期和 1990s 初期,且均发生了由多到少的突变;而暖指数由少到多的突变主要发生在 1980s 末期和 1990s 中期,稍晚于冷指数的突变时间;各子区域气温极低值指数的突变时间稍早于极高值指数的,且极值指数均发生了由少到多的突变。可见,突变后,中国沿海地区极端暖事件和气温的极值事件进入多发阶段,而极端冷事件进入相对少发的阶段。

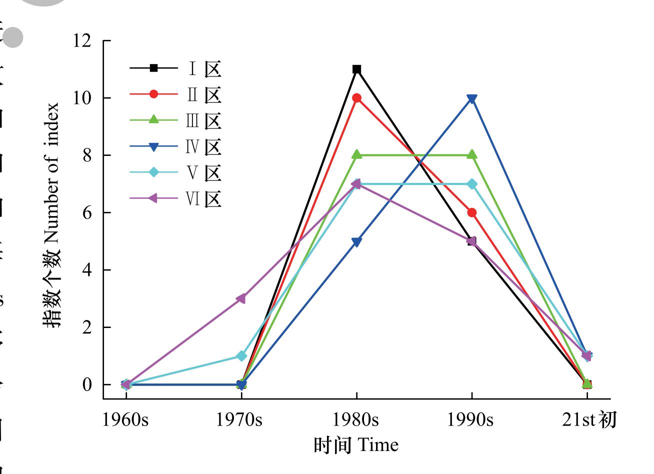


图 8　各子区域各年代内发生突变的极端气温指数个数统计

Fig.8　Number of extreme temperature indices which suffered mutation in the sub-regions in each age

2.3　气温指数变化的一致性

进行主成分分析和相关性分析,以探究极端气温指数与日均气温(T_m)、日最高(低)气温的变化趋势是否具有一致性。

极端气温指数与日均气温的主成分分析结果(表 5)显示,所提取的 3 个主成分的累积方差贡献率达 80.2%。第一主成分的方差贡献率为 57.01%,暖昼(夜)日数、热夜日数、夏季日数、生长季长度等暖指数,以及冷昼(夜)日数、霜冻日数、冷持续日数等冷指数在第一主成分中均高载荷。第二主成分占方差贡献率的 13.51%,高载荷的指数主要有冰冻日数、日最高气温的极低值、日最低气温的极低值和暖持续日数,载荷值分

别为 0.6、0.57、0.53、0.51。第三主成分占方差贡献率的 9.69%,气温日较差在第三主成分中高载荷,载荷值为 0.85。

极端气温指数与日均气温的相关性分析(表 6)表明,各极端气温指数与日均气温之间存在较好的相关性,且都通过了置信度 95%的显著性检验。暖(冷)指数与日均气温之间呈正(负)相关,所有极值指数与日均气温之间呈正相关,气温日较差与日均气温之间呈负相关。此外,除气温日较差以外,其他极端气温指数之间的相关性也较好,且绝大多数指数之间的相关性都通过了置信度 95%的显著性检验。其中,各暖指数之间、各冷指数之间均呈正相关关系,而冷指数与暖指数之间则呈负相关关系,各极值指数之间均呈正相关关系。

表 5 1961—2014 年中国沿海极端气温指数的因子载荷与解释方差

Table 5 Factor loadings and explained variances of extreme temperature indices in the coastal area of China during 1961—2014

指数 Index	主成分 Principal components			指数 Index	主成分 Principal components		
	1	2	3		1	2	3
T_m	0.98	−0.01	0.07	TXx	0.60	0.41	0.34
TX10p	−0.77	0.18	−0.32	TNx	0.77	0.32	−0.19
TN10p	−0.89	0.25	0.26	TXn	0.52	−0.57	0.31
TX90p	0.82	0.45	0.16	TNn	0.68	−0.53	0.03
TN90p	0.90	0.27	−0.18	WSDI	0.68	0.51	0.12
FD0	−0.91	0.19	0.05	CSDI	−0.74	0.27	0.31
ID0	−0.56	0.60	−0.39	GSL	0.76	−0.17	0.21
SU25	0.79	0.44	0.17	DTR	−0.41	0.23	0.85
TR20	0.81	0.20	−0.32	方差贡献率/% Variance contribution	57.01	13.51	9.69

表 6 1961—2014 年中国沿海气温指数之间的相关系数

Table 6 Correlation coefficients of temperature indices in the coastal area of China during 1961—2014

指数 Index	T_m	TX10p	TN10p	TX90p	TN90p	FD0	ID0	SU25	TR20	TXx	TNx	TXn	TNn	WSDI	CSDI	GSL	DTR
T_m	1																
TX10p	−0.80*	1															
TN10p	−0.87*	0.75*	1														
TX90p	0.81*	−0.48*	−0.54*	1													
TN90p	0.88*	−0.51*	−0.75*	0.90*	1												
FD0	−0.92*	0.69*	0.85*	−0.67*	−0.79*	1											
ID0	−0.61*	0.59*	0.54*	−0.32*	−0.33*	0.62*	1										
SU25	0.81*	−0.62*	−0.56*	0.87*	0.82*	−0.64*	−0.22	1									
TR20	0.78*	−0.58*	−0.81*	0.65*	0.82*	−0.62*	−0.18	0.70*	1								
TXx	0.53*	−0.50*	−0.34*	0.66*	0.53*	−0.38*	−0.15	0.60*	0.43*	1							
TNx	0.67*	−0.45*	−0.65*	0.71*	0.79*	−0.58*	−0.16	0.63*	0.69*	0.67*	1						
TXn	0.48*	−0.57*	−0.49*	0.21	0.28*	−0.43*	−0.68*	0.20	0.31*	0.28*	0.25	1					
TNn	0.62*	−0.49*	−0.66*	0.37*	0.49*	−0.67*	−0.69*	0.29*	0.38*	0.24	0.39*	0.73*	1				
WSDI	0.65*	−0.41*	−0.42*	0.81*	0.74*	−0.51*	−0.17	0.73*	0.62*	0.56*	0.60*	0.11	0.26	1			
CSDI	−0.68*	0.58*	0.82*	−0.42*	−0.60*	0.71*	0.43*	−0.42*	−0.60*	−0.31*	−0.58*	−0.44*	−0.54*	−0.28*	1		
GSL	0.76*	−0.65*	−0.65*	0.56*	0.58*	−0.86*	−0.56*	0.56*	0.42*	0.41*	0.43*	0.37*	0.58*	0.46*	−0.50*	1	
DTR	−0.34*	0.04	0.62*	−0.11	−0.48*	0.48*	0.05	−0.07	−0.53*	0.09	−0.39*	−0.09	−0.43*	−0.10	0.57*	−0.20	1

* 表示显著相关

对各子区域极端气温指数和日均气温进行主成分分析和相关性分析,结果如表 7 所示。

各子区域极端气温事件所提取出来的主成分个数介于 4—5 个之间,主成分方差贡献率均在 80%以上,均符合主成分分析要求。6 个子区域极端气温事件第一主成分高载荷值(载荷值>0.7)的极端气温指数较一致,

主要有暖昼(夜)日数、冷昼(夜)日数、热夜日数、夏季日数以及霜冻日数等;而各子区域第一主成分低载荷值的指数主要有气温日较差、日最高气温的极高(低)值、暖持续日数和生长季长度等,在第一主成分中高载荷值和低载荷值分别表示极端指数对日均气温具有较强的和较弱的指示性。

各子区域的相关性分析表明,与日均气温呈强正相关的极端气温指数主要是暖昼(夜)日数、生长季长度、热夜日数、夏季日数等暖指数,与日均气温呈强负相关的则主要是冷昼(夜)日数、霜冻日数以及冰冻日数等冷指数,与日均气温的强正(负)相关性分别表明极端气温暖(冷)指数的增加(减少)将同时反映出日均气温的增加。此外,所有子区域中,与其他极端气温指数呈弱相关的指数主要有气温日较差、日最高气温的极高(低)值、暖持续日数、生长季长度以及冰冻日数,除这些指数以外,各子区域其他极端气温指数两两之间的相关性均较好,且绝大多数之间的相关性都通过了置信度 95%的显著性检验。

表 7　各子区域气温指数的主成分分析和相关性分析统计

Table 7　Statistics for principal component analysis and correlation analysis of temperature indices in the sub-regions

区域 Region	主成分个数 Num	方差贡献率 CVC/%	载荷值 Load value			相关系数 Correlation coefficient		
			$L>0.7$	$L<-0.7$	$\lvert L\rvert<0.5$	$r>0.7$	$r<-0.7$	$\lvert r'\rvert<0.3$ *
Ⅰ区 Region Ⅰ	5	84.71	TN90p、TX90p	FD0、TN10p、TX10p	DTR、TXx、TXn	TN90p、TX90p	ID0、FD0、TN10p、TX10p	DTR、TXn
Ⅱ区 Region Ⅱ	4	82.43	TN90p、GSL、TR20、TX90p	TN10p、FD0、TX10p、CSDI	DTR、TXx、TXn	TN90p、GSL、TX90p、TR20	FD0、TN10p、TX10p	DTR、TXn、TXx
Ⅲ区 Region Ⅲ	4	81.92	TN90p、SU25、TR20、GSL	TN10p、FD0、TX10p、CSDI	DTR、TXx、WSDI	TN90p、SU25、GSL、TR20	FD0、TN10p、TX10p	DTR、TXn
Ⅳ区 Region Ⅳ	5	84.08	TN90p、TR20	TN10p、FD0、TX10p	DTR、WSDI、TXx	TN90p、TR20、SU25	TN10p、FD0、TX10p	WSDI、DTR、TXn、ID0、GSL
Ⅴ区 Region Ⅴ	5	84.03	TN90p、TNx、TX90p、SU25	TN10p、TX10p	DTR、GSL、ID0、TXn	TN90p、SU25、TX90p	TN10p、TX10p	DTR、GSL、TXn、ID0
Ⅵ区 Region Ⅵ	5	81.22	TN90p、TX90p、TNx、SU25、TR20	TN10p	GSL、DTR、ID0、TXn	TN90p、TX90p、SU25、TR20	TN10p	GSL、ID0、DTR、TXn

Num:主成分个数 Number of extracted principal components;CVC:方差贡献率 Cumulative variance contribution;L:载荷值 Load value in the first principal componen;r:极端气温指数与日均气温之间的相关系数 Correlation coefficient between extreme temperature indices and daily average temperature;r':极端气温指数之间的相关系数 Correlation coefficient of the extreme temperature indices between each other; * 代表所列指数与其他指数弱相关且与之弱相关的指数个数占总指数个数的 50%以上。各单元格所列指数的数值大小从左至右依次递减

对沿海地区及其子区域极端气温指数与日最高(低)气温进行主成分分析和相关性分析的结果与上述结果相一致,即在第一主成分中高载荷的极端气温指数主要是暖昼(夜)日数、热夜日数和夏季日数等暖指数,以及冷昼(夜)日数、霜冻日数和冷持续日数等冷指数,高载荷的指数之间的相关性也较强;低载荷的指数主要有气温日较差、日最高气温的极高(低)值、暖持续日数和生长季长度等,它们对日最高(低)气温变化趋势的指示性相对较弱,且与其他极端气温指数之间的相关性也较弱。

3　结论

通过对中国沿海地区 1961—2014 年极端气温事件变化特征的研究,得出以下结论:

(1)中国沿海地区及其子区域极端气温指数的变化趋势一致:极端暖指数呈上升趋势,冷指数和气温日较差呈下降趋势,夜指数的年际倾向率明显大于昼指数的年际倾向率。各子区域极端气温相对指数、极高值指数、冷(暖)持续日数的多年均值较接近,霜冻日数、冰冻日数以及气温日较差的多年均值从北至南依次递减,与之相反,夏季日数、热夜日数、极端气温极低值指数以及生长季长度的多年均值则从北至南依次增加。

(2)各子区域极端气温指数的主周期不尽相同,年际间的主周期介于 2—8 a 之间,均无显著的年代际震荡周期。各子区域极端气温指数的突变主要发生在 1980s 和 1990s 期间,冷指数和极低值指数的突变时间稍早于暖指数和极高值指数的突变时间。突变后,沿海地区极端暖事件和气温的极值事件进入多发阶段,极端冷事件进入相对少发的阶段。

(3)主成分分析中,在第一主成分高载荷的冷(暖)指数对日均气温和日最高(低)气温均有较好的指示性,它们之间的相关性也较强。低载荷的指数对日均气温和日最高(低)气温的指示性相对较弱,且与其他极端气温指数之间的相关性也较弱。

综上所述,中国沿海地区极端气温事件日趋频繁,极端气温指数的变化趋势进一步揭示了沿海地区气候变暖的事实。气候的极端化以及高强度的人类活动等对沿海地区经济社会的可持续发展、生态环境的保护以及自然灾害的防御和防治均构成了巨大的挑战,未来时期内,应加强极端气候监测与预警,加大气象灾害及其次生灾害的防御和管理能力,提升气候变化的应对能力,做到科学预警、合理防治与有效管理相结合。

参考文献(References):

[1] IPCC. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

[2] Whan K, Zscheischler J, Orth R, Shongwe M, Rahimi M, Asare E, Seneviratne S I. Impact of soil moisture on extreme maximum temperatures in Europe. Weather and Climate Extremes, 2015, 9: 57-67.

[3] Dai J, Kesternich M, Löschel A, Ziegler A. Extreme weather experiences and climate change beliefs in China: An econometric analysis. Ecological Economics, 2015, 116: 310-321.

[4] Gao Y, Feng Q, Liu W, Lu A G, Wang Y, Yang J, Chen A F, Wang Y M, Su Y B, Liu L, Ma Q Q. Changes of daily climate extremes in Loess Plateau during 1960-2013. Quaternary International, 2015, 371: 5-21.

[5] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, Caesar J, Gleason B, Tank A M G, Haylock M, Collins D, Trewin B, Rahimzadeh F, Tagipour A, Kumar K R, Revadekar J, Griffiths G, Vincent L, Stephenson D B, Burn J, Aguilar E, Brunet M, Taylor M, New M, Zhai P, Rusticucci M, Vazquez-Aguirre J L. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(D5): D05109.

[6] De los Milagros Skansi M, Brunet M, Sigró J, Aguilar E, Groening J A A, Bentancur O J, Geier Y R C, Amaya R L C, Jácome H, Ramos A M, Rojas C O, Pasten A M, Mitro S S, Jiménez C V, Martínez R, Alexander L V, Jones P D. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. Global and Planetary Change, 2013, 100: 295-307.

[7] De Lima M L P, Santo F E, Ramos A M, De Lima J J M P. Recent changes in daily precipitation and surface air temperature extremes in mainland Portugal, in the period 1941-2007. Atmospheric Research, 2013, 127: 195-209.

[8] Cinco T A, De Guzman R G, Hilario F D, Wilson D M. Long-term trends and extremes in observed daily precipitation and near surface air temperature in the Philippines for the period 1951-2010. Atmospheric Research, 2014, 145-146: 12-26.

[9] Rao B B, Chowdary P S, Sandeep V M, Rao V U M, Venkateswarlu B. Rising minimum temperature trends over India in recent decades: Implications for agricultural production. Global and Planetary Change, 2014, 117: 1-8.

[10] Dashkhuu D, Kim J P, Chun J A, Lee W S. Long-term trends in daily temperature extremes over Mongolia. Weather and Climate Extremes, 2015, 8: 26-33.

[11] Keggenhoff I, Elizbarashvili M, Amiri-Farahani A, King L. Trends in daily temperature and precipitation extremes over Georgia, 1971-2010. Weather and Climate Extremes, 2014, 4: 75-85.

[12] Deng H J, Chen Y N, Shi X, Li W H, Wang H J, Zhang S H, Fang G H. Dynamics of temperature and precipitation extremes and their spatial variation in the arid region of northwest China. Atmospheric Research, 2014, 138: 346-355.

[13] 汪宝龙, 张明军, 魏军林, 王圣杰, 马潜, 李小飞. 西北地区近 50a 气温和降水极端事件的变化特征. 自然资源学报, 2012, 27(10): 1720-1733.

[14] Li Z X, He Y Q, Wang P Y, Theakstone W H, An W L, Wang X F, Lu A G, Zhang W, Cao W H. Changes of daily climate extremes in southwestern China during 1961-2008. Global and Planetary Change, 2012, 80-81: 255-272.

[15] 陈特固, 时小军, 余克服. 华南沿海近 100 年来 2 月份的极端气温事件. 热带地理, 2008, 28(3): 199-202.

[16] Guan Y H, Zhang X C, Zheng F L, Wang B. Trends and variability of daily temperature extremes during 1960-2012 in the Yangtze River Basin, China. Global and Planetary Change, 2015, 124: 79-94.

[17] Liang K, Bai P, Li J J, Liu C M. Variability of temperature extremes in the Yellow River basin during 1961-2011. Quaternary International, 2014, 336: 52-64.

[18] 王刚, 严登华, 张冬冬, 刘少华. 海河流域 1961 年-2010 年极端气温与降水变化趋势分析. 南水北调与水利科技, 2014, 12(2): 1-6, 11-11.

[19] 伊飞, 张训华, 胡克. 海岸带陆海相互作用研究综述. 海洋地质前沿, 2011, 27(3): 28-34.

[20] 董锁成, 陶澍, 杨旺舟, 李飞, 李双成, 李宇, 刘鸿雁. 气候变化对中国沿海地区城市群的影响. 气候变化研究进展, 2010, 6(4): 284-289.

[21] Jiao N Z, Chen D K, Luo Y M, Huang X P, Zhang R, Zhang H B, Jiang Z J, Zhang F. Climate change and anthropogenic impacts on marine ecosystems and countermeasures in China. Advances in Climate Change Research, 2015, 6(2): 118-125.

[22] 王米雪, 延军平, 李双双. 1960~2013 年中国东南沿海地区旱涝时空变化特征及其趋势分析. 资源科学, 2014, 36(11): 2307-2315.

[23] 黄小燕, 王小平, 王劲松, 冯建英, 王圣杰. 1960~2013 年中国沿海极端气温事件变化特征. 地理科学, 2016, 36(4): 612-620.

[24] 王琼, 张明军, 王圣杰, 骆书飞, 汪宝龙, 朱小凡. 1962-2011 年长江流域极端气温事件分析. 地理学报, 2013, 68(5): 611-625.

[25] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61-78.

[26] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版). 北京: 气象出版社, 2007: 63-66.

[27] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 胡远满. 1961-2005 年东北地区气温和降水变化趋势. 生态学报, 2013, 33(2): 519-531.

[28] 李占玲, 王武, 李占杰. 基于 GPD 分布的黑河流域极端降水频率特征分析. 地理研究, 2014, 33(11): 2169-2179.

[29] You Q L, Kang S C, Aguilar E, Pepin N, Flügel W A, Yan Y P, Xu Y W, Zhang Y J, Huang J. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961-2003. Climate Dynamics, 2011, 36(11-12): 2399-2417.

[30] 刘琳, 徐宗学. 西南 5 省市极端气候指数时空分布规律研究. 长江流域资源与环境, 2014, 23(2): 294-301.